



УДК 621.382.002

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.244.245

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-TSV-СТРУКТУР

## RESEARCHING SILICON DEEP PLASMA ETCHING PROCESS FOR PRODUCING 3D-TSV STRUCTURES

ГОЛИШНИКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

GOLISHNIKOV ALEXANDER A.

ПУТЯ МИХАИЛ ГЕОРГИЕВИЧ

PUTRYA MIKHAIL G.

ШЕВЯКОВ ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ

SHEVYAKOV VASILY I.

Shev@dtd.miee.ru

Shev@dtd.miee.ru

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

National Research University of Electronic Technology  
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

Представлены результаты исследования особенностей процесса глубокого плазменного травления кремния для создания 3D-TSV-структур как одного из основополагающих в технологии изготовления 3D-ИС. В работе исследовано влияние операционных параметров плазменного травления кремния на технологические характеристики процесса в источнике высокоплотной трансформаторно-связанной плазмы. Показан ионностимулированный характер осаждения фторуглеродной пленки.

**Ключевые слова:** процесс глубокого плазменного травления кремния; 3D-TSV-структуры; высокоплотная трансформаторно-связанная плазма; апертурный эффект; 3D-ИС; задержка РИТ; 3D TSV-технология; сквозные отверстия в кремнии.

The paper presents the results of studies of one of the fundamental processes in the 3D ICs technology — the silicon deep plasma etching for 3D-TSV structures producing. Besides, the work studies the influence of operating parameters in Si etching cycle on the process characteristics in high-density transformer coupled plasma (TCP). The ion-stimulated mechanism of the fluoride-carbon film deposition has been shown.

**Keywords:** process of silicon deep plasma etching; 3D-TSV structures; high-density transformer coupled plasma; aperture effect; 3D-IC; RIE lag; 3D-TSV technology; through silicon vias.

В настоящее время одним из перспективных методов создания современных полупроводниковых приборов уровня «система в корпусе» является метод формирования трехмерных интегральных схем и систем с помощью 3D TSV-технологии, позволяющий увеличить плотность компоновки активных элементов, повысить быстродействие приборов, уменьшить потребляемую изделием мощность и исключить возможность копирования схемотехнического решения, реализованного в приборе [1].

Одной из критических технологических операций вышеуказанного метода является процесс плазменного травления сквозных отверстий в кремнии (TSV — Through Silicon Vias), определяющий профиль TSV и последующий метод беспустотного их заполнения металлом [2, 3]. Поскольку изготовление TSV в значительной степени зависит от критических размеров формируемых сквозных отверстий, стремящихся в настоящее время к  $\varnothing 1$  мкм и менее, при высоких аспектных отношениях  $AO \geq 10:1$  и плотности TSV на пластине [4], в данной работе исследовался процесс глубокого плазменного травления (ГПТ) для создания сквозных отверстий в монокристаллическом кремнии, применяемых в технологии 3D ИС/ИС-интеграции кристаллов.

Для ГПТ Si в работе использовался Bosch-процесс, реализованный в источнике высокоплотной трансформаторно-связанной плазмы. В качестве рабочих газов для процесса ГПТ Si применялись гексафторид серы в цикле травления, октафторциклобутан или трифторметан в цикле полимеризации. Экспериментальные

образцы представляли собой монокристаллические кремниевые пластины диаметром  $\varnothing 100$  мм, на поверхности которых была сформирована фоторезистивная маска толщиной 1 мкм с системой отверстий диаметром  $\sim$  от 1,5 до 2,5 мкм. Геометрические размеры кремниевых структур до и после глубокого плазменного травления измерялись с помощью методов сканирующей электронной микроскопии и оптической спектрометрии.

В работе исследовалось влияние операционных параметров травления Si (ВЧ-мощность индуктора, рабочее давление, расход  $SF_6$ , ВЧ-мощность смещения) на технологические характеристики процесса (скорость травления Si, селективность и профиль травления). При этом операционные параметры стадии пассивации не менялись и были постоянными.

При исследовании процесса ГПТ TSV получены корреляционные зависимости скорости травления кремния, селективности травления Si к фоторезистивной маске, профиля травления структур от энергетических и концентрационных характеристик ионов и радикалов в плазме.

Определены значения ВЧ-мощности на индукторе, при которых происходит деструкция фоторезистивной маски, что приводит к изменению конфигурации формируемых структур и их линейных размеров. Кроме того, выявлены значения ВЧ-мощности на индукторе, при которых скорость травления Si незначительна (менее 2 мкм/мин), что не удовлетворяет с точки зрения производительности; на дне структуры присутствуют



микронеровности в виде микроигл и столбчатых структур, и возникает ситуация, при которой возможна полная остановка процесса травления кремния.

В ходе выполнения работы при проведении процесса глубокого плазменного травления Si-структур с различными линейными размерами наблюдался так называемый апертурный эффект, связанный с механизмом «задержки РИТ», который вызван причинами, рассмотренными в [5].

Выявлено, что на стадии полимеризации на наклонной поверхности структуры наблюдается увеличение скорости осаждения фторуглеродной пленки (ФУП) по сравнению со скоростью осаждения на вертикальной поверхности. Но в то же время на дне канавки скорость осаждения фторуглеродной пленки больше, чем на наклонной поверхности структуры. Эти результаты свидетельствуют об ионностимулированном характере осаждения ФУП и показывают, что на скорость осаждения ФУП влияет угол падения ионов.

Одновременно на данных образцах исследовали адгезионную способность фторуглеродной пленки к кремнию и оксиду кремния. Показано, что адгезия на исследуемых образцах отсутствует или имеет малые значения. Поэтому требуется дополнительная обработка поверхности после ГПТ Si, направленная на удаление ФУП.

Таким образом, в ходе выполнения работы исследован процесс глубокого плазменного травления кремния, в ходе которого определены критичные моменты в технологии плазменного травления сквозных отверстий в кремнии, которые необходимо учитывать при изготовлении 3D TSV-структур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Topol A. et al. *3D Integrated Circuits* // IBM Journal of Research and Development, 2006. 491 p.
2. Wu X., Zhao W., Nakamoto M., Nimmagadda C. et al. *Electrical characterization for interior connections and timing analysis for 3D ICs* // IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst., 2012. Vol. 20. № 1. P. 186–191.
3. Golishnikov A.A., Kostyukov D.A., Putrya M.G. *Research and Development of Deep Anisotropic Plasma Silicon Etching Process to Form MEMS Structures* // Russian Microelectronics, 2012. Vol. 41. № 7. P. 9–13.
4. Wen-Wei Shen, Kuan-Neng Chen. *Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV)* // Nanoscale Research Letters, 2017. Vol. 12. № 1. P. 1–9.
5. Buie M.J., Joshi A.M. and Regis J. *Reducing RIE lag with chemistry* // Electrochemical Society Proceedings, 1996. Vol. 96–12. P. 469–479.

### КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 920 руб.

#### ИНДУКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Е. В. Берлин, В. Ю. Григорьев, Л. А. Сейдман

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 464 с.  
ISBN 978-5-94836-519-0

Тенденции развития современной технологии электронной техники заключаются в увеличении степени интеграции изделий на поверхности подложек. Степень интеграции, в свою очередь, напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве подложек, так и с уменьшением геометрических размеров элементов изделий на их поверхности. Сегодня размеры используемых полупроводниковых подложек возросли до 450 мм, а размеры элементов, формируемых на пластине в серийном производстве, уменьшились до 0,02–0,04 мкм. В результате степень интеграции выросла до 1 млрд и более полупроводниковых приборов на одной пластине.

Кроме полупроводниковых подложек, используют диэлектрические подложки из стекла, керамики и т.п., а также гибкие полимерные подложки, из которых изготавливают дисплеи, размеры которых достигают нескольких метров.

В книге приведено описание принципов действия, особенностей и преимуществ источников ICP и рассмотрены многочисленные варианты конструкций современных источников ICP. Приведены также примеры технологических применений описываемых источников для нанесения тонких пленок: в процессах PVD и PECVD. И, кроме того, описано формирование плазмохимическим травлением трехмерных структур в различных материалах и двумерных структур в тонких пленках, а также связанное с такой обработкой существенное изменение свойств поверхностей различных материалов, в особенности полупроводников.

Таким образом, настоящая книга представляет собой подробное справочное руководство по конструкциям и применению источников ICP. В ней обобщено современное развитие этих технологических процессов и используемого для них оборудования. Книга рассчитана на студентов, аспирантов, конструкторов нового технологического оборудования, использующего источники ICP, и технологов, работающих на таком оборудовании. Конструкторы найдут в ней обзор способов достижения высоких параметров источников ICP, а технологи ознакомятся с широким спектром их применения и полученных с их помощью достижений. Она также будет полезна в качестве учебного пособия для студентов старших курсов и аспирантов соответствующих специализаций.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru